

Elementos Superpesados

Fabiola Monroy-Guzmán*

RESUMEN

Los elementos superpesados o “transactínidos” son elementos sintéticos con $Z > 104$, situados en el séptimo periodo de la tabla periódica. Son producidos mediante reacciones de fusión de dos átomos más ligeros, con ayuda de aceleradores de partículas. Poseen vidas medias típicamente de fracciones de segundos y su tasa de producción es de unos cuantos átomos.

Palabras claves: transactínidos, elementos superpesados, fusión.

ABSTRACT

Super heavy elements or "transactinides" are synthetic elements with $Z > 104$, located in the seventh period of the periodic table. They are produced by fusion reactions of two lighter atoms, with the help of particle accelerators. They have half-lives of seconds and their production rate is only a few atoms.

Keywords: transactinides, super heavy elements, fusion.

Los elementos superpesados son aquellos pertenecientes al séptimo periodo de la tabla periódica, cuyos números atómicos comprenden entre el rutherfordio ($_{104}\text{Rf}$) y el oganesón ($_{118}\text{Og}$), siendo este último el elemento más pesado de la tabla periódica actual. A los elementos superpesados también se les conoce como “transactínidos” porque se encuentran después de los actínidos en la tabla periódica.

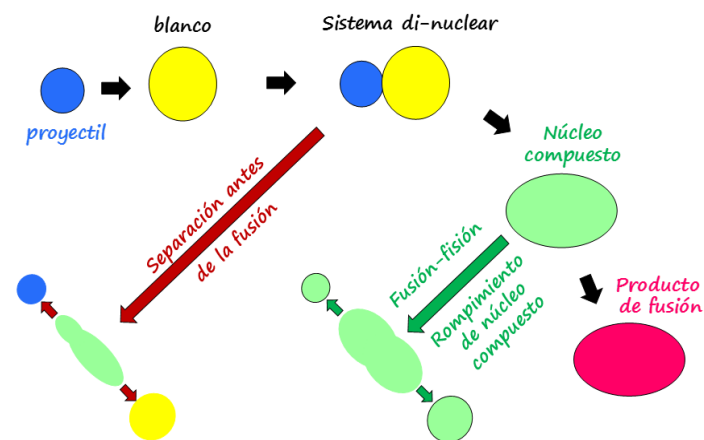


Figura 1. Proceso de síntesis de elementos superpesados.

Los elementos superpesados no existen en la naturaleza, y no parecen ser sintetizados durante la nucleosíntesis que ocurre en las estrellas. Son elementos sintéticos, que han sido creados por el ser humano.

¿Cómo se producen los elementos superpesados?

Los elementos superpesados son sintéticos y se producen básicamente por la fusión de dos átomos más ligeros, de cuya suma resulta el número atómico que se quiere sintetizar. Sin embargo, existen limitaciones que impiden que el proceso de fusión de dos núcleos iniciales se produzca fácilmente:

- 1) La cantidad de protones y neutrones de los dos núcleos iniciales debe ser compatible para que el producto formado sea el más estable posible.
- 2) Es necesario disparar el átomo-proyectil (es el más ligero) lo suficientemente rápido sobre el blanco (el átomo más pesado), para que su velocidad pueda superar la fuerza de repulsión eléctrica de los dos núcleos, dado que los protones están cargados positivamente y se repelen entre sí (repulsión de Coulomb).

En átomos pequeños, esta repulsión se compensa con otras fuerzas (i.e., la interacción entre los nucleones o la fuerza nuclear), pero cuando la cantidad de protones supera los 104 en un átomo, la repulsión de Coulomb toma el control. Por ello, una vez que el proyectil está lo suficientemente cerca del blanco, la repulsión debe invertirse y la fuerte interacción nuclear superar la repulsión eléctrica, de forma que al chocar los dos núcleos (imaginemos que se trata de dos gotas), las superficies nucleares se toquen entre sí y formen “una sola gota” de material nuclear, es decir el núcleo superpesado (ver Figura 1). Así, los átomos de los elementos superpesados se forjan por fusión nuclear. Para ello se utilizan aceleradores de partículas de alta energía o ciclotrones, que confieran la energía suficiente al proyectil para permitir su fusión con el blanco y así formar el átomo pesado; sin embargo, si la energía de bombardeo del proyectil es muy alta, los átomos formados por fusión se fisionan (Figura 1). El problema de la fusión de núcleos pesados radica, por tanto, en la gran cantidad de protones en ambos núcleos. Esto crea un campo eléctrico que los repele intensamente.

Experimentalmente se han seguido dos vías para sintetizar a los elementos superpesados:

- 1) La “fusión fría” en donde se utilizan proyectiles de elementos estables como el ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{59}Co o ^{70}Zn , sobre blancos estables

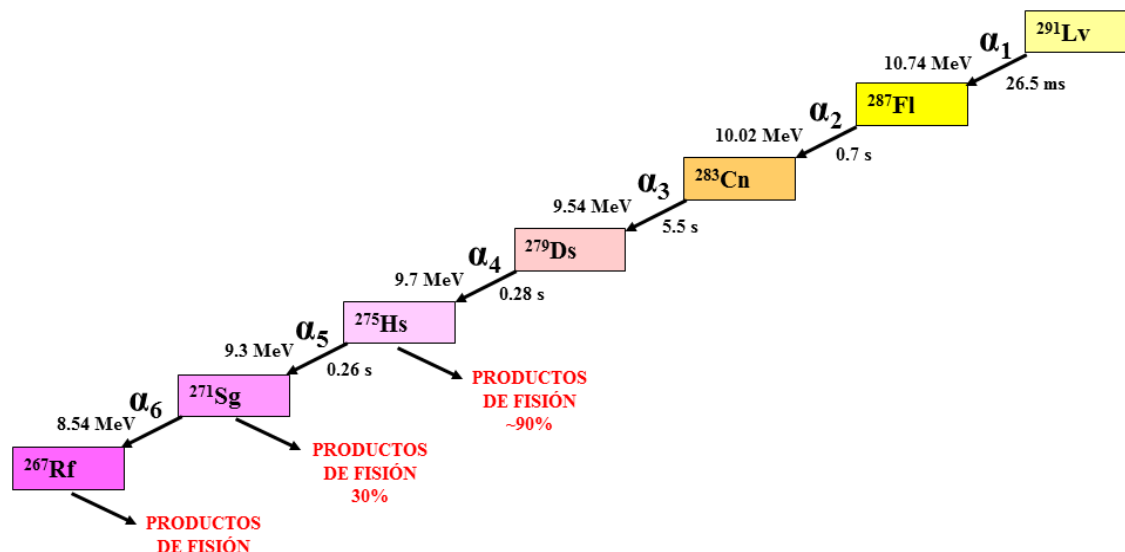


Figura 2. Decaimiento radioactivo del Lv-291.

como el ^{208}Pb o el ^{209}Bi , formándose un nuevo núcleo cuyo número atómico (Z) es igual a la suma del proyectil y el blanco ($Z = Z_P + Z_B$) (ver Tabla 1). La energía del proyectil es elegida para que el núcleo compuesto formado esté “frío”, es decir, contenga energías de excitación bajas y emita un mínimo de partículas. Este tipo de reacciones han sido empleadas para producir elementos con $Z = 107$ a 113 (Ver Tabla 1).

2) La “fusión caliente” utiliza proyectiles de ^{48}Ca y blancos radioactivos transuránicos como el ^{244}Pu , ^{243}Am , ^{248}Cm , ^{249}Bk o ^{249}Cf . En este caso el núcleo compuesto (superpesado) tiene energías de excitación entre 30 y 36 MeV y se desexcita evaporando (emitiendo) neutrones y radiación gamma. De esta manera se han producido isótopos ricos en neutrones con $Z = 104-106$, $112-116$ y $Z = 118$.

¿Cuánto se produce del elemento superpesado?

Solo una muy pequeña fracción de los átomos proyectados pueden fusionarse con los átomos del blanco. Esto se debe a que la probabilidad de que ocurra la fusión de estos núcleos es muy baja, del orden de 10^{-3} a 10^{-11} mbarns, parámetro conocido como sección eficaz (σ), que mide la probabilidad de interacción entre los proyectiles y el blanco. Por ello, la formación de estos elementos es un evento extremadamente raro (menos de un caso en un millón), pues la mayoría de las veces los átomos “rebotan” uno sobre el otro sin que sus núcleos se fusionen. Por tanto, las tasas de su producción son muy bajas, del orden de sólo algunos átomos, aun cuando los experimentos duren del orden de 1000 horas. Para ilustrar este hecho, señalemos que para encontrar un puñado de átomos de nihonio (^{113}Nh) mediante la fusión de bismuto (^{209}Bi) y zinc (^{70}Zn), se han requerido 10 años de trabajo el Centro Nishina para Ciencias Basadas en Aceleradores (RIKEN), en Japón.

¿Cuánto viven los elementos superpesados?

Estos núcleos superpesados tienen una vida tan breve que desaparecen casi inmediatamente. Debido a que son tan pesados, la fuerza de cohesión de los nucleones no es suficiente para sobrepasar la fuerza de repulsión de los protones y, en consecuencia, el núcleo arroja nucleones hasta que se vuelve lo

suficientemente estable. Por ello una vez creados, se desintegran espontáneamente en cuestión de milisegundos o microsegundos. Los elementos superpesados se desintegran básicamente por la emisión de partículas alfa (^4He) o por fisión espontánea, en donde el núcleo se divide espontáneamente en dos núcleos más ligeros. La fisión espontánea es un modo de descomposición del núcleo que ocurre principalmente en elementos pesados ($Z > 94$), y cuya probabilidad aumenta con el incremento de Z .

¿Cómo sabemos que hemos sintetizado un nuevo elemento?

Dado que los elementos superpesados son muy inestables y se desintegran casi instantáneamente, su detección se realiza analizando las huellas que dejan tras de sí. Es decir, se estudian sus “esquemas” de desintegración para identificarlos, dado que los átomos radiactivos al desintegrarse expulsan partículas (beta, alfa), radiaciones electromagnéticas (rayos gamma o X), o neutrones (ver Figura 2); o bien, al escindirse (fragmentarse o fisionarse) en elementos más ligeros, estos pueden ser detectados mediante técnicas de retroceso (medida de las masas por tiempos de vuelo) o directamente en espectrómetros de masas que permiten separar los núcleos formados en función de su relación masa/carga. En el caso de las técnicas por retroceso, los núcleos separados se implantan en un detector de Si de bandas y se correlaciona temporalmente al ion implantado con las sucesivas partículas alfas emitidas en esa misma zona del detector. A partir de las energías de las partículas alfa detectadas se puede identificar al nuevo núcleo.

¿Efectos relativistas en los elementos superpesados?

La tabla periódica da a los átomos de un mismo grupo propiedades químicas similares. En este sentido, el teneso ($Z = 117$) lógicamente debería tener la misma reactividad química que el flúor o el yodo. Sin embargo, la elevada carga de los núcleos pesados conlleva a efectos de tipo relativistas que aumentan con el número atómico, hacia los electrones de los orbitales atómicos, caracterizados por una gran probabilidad de presencia a nivel nuclear. Estos efectos son particularmente importantes para los orbitales de simetría esférica (tipo s). Los electrones de estos orbitales, al contacto con núcleos muy cargados, son acelerados

a diversas velocidades próximas a una fracción significativa de la velocidad de la luz. De acuerdo a la teoría de la relatividad general, la masa del electrón aumenta con la velocidad, y esto se traduce en una contracción del orbital acompañada de un aumento de la energía de enlace. La modificación de energías de enlace y de los radios de los orbitales electrónicos de los átomos, pueden introducir variaciones significativas de las propiedades químicas de los elementos pesados. Estas modificaciones pueden permitir la estabilización de grados de oxidación diferentes a los extrapolados a partir de la pertenencia a una columna de la tabla periódica, así como variaciones sensibles de los radios iónicos. Para comprobar experimentalmente estas alteraciones, los científicos se enfrentan con diversos inconvenientes: no es posible producir actualmente los elementos superpesados, ni en el futuro cercano, en cantidades ponderables, debido a los muy bajos rendimientos de su producción (e.g., un sólo átomo por minuto para Rf o uno por día para Fl), las muy cortas vidas medias que poseen estos elementos (p. ej., ~ 1 min para Rf a ~ 1 s para Fl), la dificultad de detectar los pocos átomos producidos, y la limitación del número de experimentos químicos realizables. Por ello, se requieren sistemas especiales que se encuentren cercanos al lugar de producción (acelerador) y el montaje de métodos de separación aplicados a la escala de indicadores, es decir, de átomos, como la cromatografía de intercambio de iones o la termocromatografía, que permiten realizar experimentos rápidos, eficientes, y repetitivos de un átomo a la vez para probar y probar su comportamiento.

¿Quiénes han descubierto los elementos superpesados?

Los laboratorios que han producido y descubierto los elementos superpesados son básicamente cuatro: el Instituto Central de Investigación Nuclear (JINR) en Dubna, Rusia; el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) en California en los Estados Unidos; el Centro de Investigación para Iones Pesados (GSI) cerca de Darmstadt en Alemania; y el Centro Nishina para Ciencias Basadas en Aceleradores (RIKEN), en Tokio, Japón (ver Tabla 1).

El JINR y el LBNL produjeron paralelamente los elementos 104 al 106 (Rf, Db y Sg), el GSI sintetizó los elementos 107 al 112 (Bh, Hs, Mt, Ds, Rg y Cn), el RIKEN el elemento 113 (Nh) y los elementos 114 al 118 (Fl, Mc, Lv, Ts y Og) fueron sintetizados conjuntamente por los laboratorios JINR y LBNL, con ayuda de otras instituciones estadounidenses como el Laboratorio Nacional Oak Ridge (ORNL), la Universidad de Vanderbilt, y el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL).

¿Quién certifica que un elemento superpesado ha sido sintetizado?

Los responsables de aprobar o rechazar el descubrimiento de un nuevo elemento son dos organismos: la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) y la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPPA), apoyadas por un grupo de expertos conocidos con el nombre de Joint Working Party (JWP) presidido por Paul Karol, químico nuclear de la Universidad Carnegie-Mellon, en Pittsburgh, Pensilvania. Ambos organismos evalúan, de manera independiente, los resultados de los exámenes realizados por la JWP, y mediante pares de ambos organismos, dan su dictamen. La IUPAC también define el nombre de los nuevos elementos, previo consenso con los descubridores y la comunidad científica.

¿Para qué sirven los elementos superpesados?

El estudio de los elementos superpesados es importante tanto desde una perspectiva fundamental como tecnológica, pues nos permite explorar y aprender sobre la estructura de los átomos, las fuerzas nucleares, y las características de los electrones (sus orbitales) en un contexto de fuerte repulsión de Coulomb. A partir de estos conocimientos, es posible mejorar los modelos de núcleos atómicos con implicaciones en ámbitos tan variados como la medicina nuclear, o nuestra comprensión de la formación de los elementos del universo. También nos permite verificar nuestros conocimientos sobre los efectos relativistas atómicos, de gran importancia para las propiedades químicas de los elementos pesados, y nos ayuda, de manera más general, a comprender mejor las interacciones complejas e irreversibles de los sistemas cuánticos. Así pues, el estudio de los elementos superpesados es un desafío científico, cuyos alcances y límites son difíciles aún de conocer.

¿Cuántos elementos químicos pueden existir?

Desgraciadamente no tenemos una respuesta definitiva a esta pregunta. Hasta ahora, el elemento más pesado que ha sido producido es el oganesón ($Z = 118$). Sin embargo, la carrera ahora se perfila hacia el descubrimiento de los elementos 119 y 120, ya que modelos teóricos han predicho que más allá de 120 protones, existe una "isla de estabilidad", un área donde núcleos superpesados, ricos en neutrones, podrían existir con vidas medias largas (hasta varios millones de años), gracias a una particular configuración de protones y neutrones, predicha por varios modelos teóricos. El modelo de capas nucleares, desarrollado por María Goeppert-Mayer y Hans Daniel Jensen, en donde los protones y neutrones ocupan capas que pueden contener un número máximo de protones y neutrones, establece que la máxima estabilidad de una capa se presenta cuando se completa totalmente. Por ello, el número de protones o de neutrones que ocupan estas capas son calificados como "número mágicos" tanto para protones como neutrones. Estos números son: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, y 126 sólo para protones, y 184 sólo para neutrones. Cuando el número de protones y neutrones poseen ambos números mágicos se habla de un núcleo doblemente mágico. La teoría sugiere por ejemplo que un núcleo compuesto de 114 protones y 184 neutrones sería doblemente mágico; sin embargo, hasta ahora, aunque se han producido isótopos con (o cerca de) $Z = 114$ protones, ninguno ha llegado a contener 184 neutrones. Por su parte, los modelos no relativistas favorecen la isla de estabilidad de elementos superpesados alrededor de $Z = 124$ o 126 y $N = 184$; y los modelos relativistas favorecen una zona de estabilidad más extendida, centrada alrededor de $Z = 120$ y $N = 172$. Sin embargo, actualmente, los isótopos de los nuevos elementos que se han descubierto están en la "orilla" de este islote, ya que todavía no podemos llegar al centro y sólo la producción de estos núcleos nos dirá dónde se localiza la isla y por tanto qué modelo describe mejor los núcleos superpesados.

La teoría moderna de la estructura electrónica relativista sugiere que la tabla periódica termina alrededor del elemento 173. Allí, la energía de enlace del electrón $1s$ (1.022 MeV) alcanza el doble del valor de la masa del electrón (que es equivalente a 0.511 MeV) de modo que un par puede crear espontáneamente un anti-electrón (positrón) y un electrón, y romper el sistema atómico.

Elemento	Símbolo	Reacción(es) de Producción	Sintetizado por primera vez en	Año	Origen del nombre (en honor a)
Rutherfordio	$^{104}_{\text{Rf}}$	$^{249}\text{Cf}(^{12}\text{C},4n)^{257}\text{Rf}$ $^{249}\text{Cf}(^{13}\text{C},3n)^{259}\text{Rf}$	JINR	1969	Ernest Rutherford, físico británico quien identificó los tres componentes principales de la radiación: alfa, beta y gamma, y formuló una teoría de la estructura atómica.
Dubnio	$^{105}_{\text{Db}}$	$^{249}\text{Cf}(^{15}\text{N},4n)^{260}\text{Db}$	LBNL	1970	Dubna, región de Rusia donde se localiza el JINR, lugar de síntesis del Db.
Seaborgio	$^{106}_{\text{Sg}}$	$^{249}\text{Cf}(^{18}\text{O},4n)^{263}\text{Sg}$	JINR, LBNL	1974	Glenn Theodore Seaborg, químico nuclear estadounidense quien descubrió y sintetizó varios elementos transuránicos.
Bohrio	$^{107}_{\text{Bh}}$	$^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr},n)^{262}\text{Bh}$	JINR, LBNL	1981	Niels Bohr, físico danés, por sus trabajos sobre la estructura atómica y la radiación.
Hasio	$^{108}_{\text{Hs}}$	$^{208}\text{Pb}(^{58}\text{Fe},n)^{265}\text{Hs}$	GSI	1984	Hesse, estado alemán en el que se encuentra el laboratorio GSI, donde este elemento fue sintetizado por vez primera.
Meitnerio	$^{109}_{\text{Mt}}$	$^{209}\text{Bi}(^{58}\text{Fe},n)^{266}\text{Mt}$	GSI	1982	Lise Meitner, física sueca-austriaca, quien descubrió la fisión nuclear con O. Hahn.
Darmastatio	$^{110}_{\text{Ds}}$	$^{209}\text{Bi}(^{59}\text{Co},n)^{267}\text{Ds}$	GSI	1991	Darmstadt, ciudad alemana sede del GSI, donde fue descubierto el Ds.
Roentgenio	$^{111}_{\text{Rg}}$	$^{209}\text{Bi}(^{64}\text{Ni},n)^{272}\text{Rg}$	GSI	1994	Wilhelm Conrad Roentgen, físico alemán, descubridor de los rayos X.
Copernicio	$^{112}_{\text{Cn}}$	$^{208}\text{Pb}(^{70}\text{Zn},n)^{277}\text{Cn}$	GSI	1996	Nicolás Copérnico, astrónomo y canónigo polaco que formuló la teoría heliocéntrica del sistema solar.
Nihonio	$^{113}_{\text{Nh}}$	$^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn},n)^{278}\text{Nh}$	GSI	2004	Nihon, es en japonés uno de los nombres de Japón, lugar donde se descubrió el Nh.
Flerovio	$^{114}_{\text{Fl}}$	$^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},n)^{295}\text{Fl}$	RIKEN	2000	Georgii Nikolayevich Flerov, físico nuclear ruso; bajo su dirección se sintetizaron el No, Lr, Rf, Db, Sg y Bh y fue fundador del JINR en Rusia.
Moscovio	$^{115}_{\text{Mc}}$	$^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca},n)^{290}\text{Mc}$	JINR-LBNL	2004	Moscú, región donde se localiza el JINR, lugar del descubrimiento del Mc.
Livermorio	$^{116}_{\text{Lv}}$	$^{248}\text{Cm}(^{48}\text{Ca},3n)^{293}\text{Lv}$	JINR-LBNL	2005	Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, institución hermana del LBNL donde fueron descubiertos varios elementos superpesados.
Teneso	$^{117}_{\text{Ts}}$	$^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca},3n)^{294}\text{Tn}$	JINR-LBNL	2010	Tennessee, estado norteamericano donde se encuentra Oak Ridge National Laboratory, que proporcionó el blanco de Bk necesario para la producción del Ts.
Oganesión	$^{118}_{\text{Og}}$	$^{249}\text{Cf}(^{48}\text{Ca},n)^{296}\text{Og}$	JINR-LBNL	2006	Yuri Ts. Oganessian, físico ruso, quien ha jugado un papel esencial en el descubrimiento de los elementos más pesados de la tabla periódica.

Tabla 1. Nombres y símbolos, aprobados por la IUPAC de los 15 elementos superpesados descubiertos hasta 2018, así como el año de su descubrimiento, las reacciones nucleares llevadas a cabo para su producción, y el origen de sus nombres.

Sin embargo, los datos experimentales existentes y los modelos teóricos no permiten que se realicen predicciones confiables sobre las probabilidades de fusión para los isótopos de elementos más allá del 118, o sobre sus propiedades nucleares (como su modo de desintegración, vida media, masa y barrera de fisión). Por lo tanto, se necesitan más estudios sobre los isótopos superpesados conocidos para permitir el desarrollo de modelos más confiables, que a su vez guiarán la síntesis de estos elementos en experimentos de un año de duración con aceleradores potentes.

La producción de elementos con $Z > 119$ presenta varios problemas técnicos si se sigue el método convencional de producción de los elementos superpesados menores a 118, en donde iones de ^{48}Ca son irradiados sobre núcleos de transuránicos más pesados que el berkelio. Por un lado, el uso de proyectiles más pesados que el ^{48}Ca , que posean un exceso de neutrones, no son núcleos doblemente mágicos, lo que significa que las probabilidades de fusión para la formación del núcleo compuesto disminuyen drásticamente. Esto implica el desarrollo de nuevos aceleradores, capaces de manejar proyectiles más pesados y que también puedan acelerar simultáneamente un mayor número de iones, así como blancos resistentes al calor liberado por la alta corriente, métodos más rápidos y eficientes de separación de iones producidos y productos parásitos, y detectores más sensibles.

Perspectivas

Actualmente se están construyendo nuevos aceleradores y desarrollando nuevos dispositivos experimentales en varios laboratorios, con el objetivo de alcanzar las condiciones experimentales que impone la síntesis de elementos con $Z > 118$. En el JINR se está construyendo un complejo acelerador llamado "SHE-Factory" (SHE acrónimo de Super Heavy Elements), donde se está desarrollando un nuevo ciclotrón (DC-280 cyclotron) así como blancos, dispositivos de separación y detectores adecuados para las nuevas condiciones de síntesis de los elementos superpesados. En el RIKEN, el acelerador lineal de iones pesados se está actualizando con una fuente de iones de resonancia de ciclotrón de electrones superconductores de 28 GHz, un resonador superconductor de cuarto de onda y un nuevo separador gaseoso de iones de retroceso. Otras construcciones en proceso son el Espectrómetro Super Separator (S3) en SPIRAL2 (Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne, fase II) en GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds), Francia y un acelerador lineal de onda continua superconductor en GSI.

Se están realizando también arduos intentos para crear los elementos 119 y 120, sin éxito hasta el momento. El laboratorio RIKEN trató de sintetizar el elemento 119 a partir de la reacción nuclear: $^{248}\text{Cm} + ^{51}\text{V}$, en tanto que el grupo de GSI a través de $^{249}\text{Bk} + ^{50}\text{Ti}$. En JINR se intentó la síntesis del elemento 120 a través de las reacciones $^{244}\text{Pu} + ^{58}\text{Fe}$ y en GSI mediante las reacciones: $^{238}\text{U} + ^{64}\text{Ni}$, $^{248}\text{Cm} + ^{54}\text{Cr}$, y $^{249}\text{Cf} + ^{50}\text{Ti}$.

REFERENCIAS

1. Scerri, E. Restrepo, G., Ed. *Mendeleev to Oganesson: A Multidisciplinary Perspective on the Periodic Table*; Oxford University Press: USA, 2018.
2. Hofmann, S. *On Beyond Uranium: Journey to the End of the Periodic Table*. Taylor & Francis: London, U.K., 2002.
3. Düllmann, C. E.; Block, M. La course aux éléments superlourds. *Pour la Science* **2019**, 296, 29-36.
4. Ishkhanov, B. S.; Tretyakova, T. Yu. The way to superheavy elements. *Moscow University Physics Bulletin* **2017**, 72, 203–223.
5. Jacquet, D.; Morjean, M. La stabilité des éléments super-lourds sondée par des mesures de temps de fission. *Images de la Physique* **2009**, 42-48. <http://hal.in2p3.fr/in2p3-00495364>
6. Oganessian, Y. T.; Utyonkov, V. K. Super-heavy element research. *Rep. Prog. Phys.* **2015**, 78, 036301.
7. Oganessian, Y. T. Synthesis and decay properties of superheavy elements. *Pure Appl. Chem.* **2006**, 78, 889-904.
8. Morita, K. SHE research at RIKEN/GARIS. *Nucl. Phys. A.* **2015**, 944, 30-61.
9. Münzenberg, G. From bohrium to copernicium and beyond SHE research at SHIP. *Nucl. Phys. A.* **2015**, 944, 5-29.
10. Oganessian, Y. T.; Utyonkov, V. K. Superheavy nuclei from ^{48}Ca -induced reactions. *Nucl. Phys. A.* **2015**, 944, 62-98.
11. Hoffman, D. C.; Lee, D. M.; Pershina, V. Transactinide elements and future elements. In: *The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements*. Vol. 3. Morss, L. R.; Edelstein, N. M.; Fuger, J., Eds.; Springer: Berlin, Germany, Reprinted 2008; pp. 1652-1752.
12. Haba, H. A new period in superheavy-element hunting. *Nature Chem.* **2019**, 11, 10–13.